

子母管结构尾迹涡脱落的近壁面效应

臧志鹏, 高福平, 崔金声, 唐驰

(中国科学院力学研究所 水动力与海洋工程重点实验室, 北京, 100190, Email: zpzang@imech.ac.cn)

摘要: 利用底部激光照射方法对水流下近壁面处的子母管结构尾流场进行 PIV 粒子图像速度场测量。取旋流强度作为流场旋涡强弱的表征参量, 研究了无量纲子母管距离比 (G/D)、母管与壁面的间距比 (e/D) 以及子母管直径比 (d/D) 等因素对结构尾涡脱落的影响。在亚临界流动条件下, 当 $G/D > 0.25$ 时, 子管对母管的涡脱落影响较小, 二者尾迹相互独立, 形成两列独立涡街; 当 $G/D < 0.15$ 时, 子管对母管的涡脱落抑制作用明显, 同时母管对子管的涡脱落也有抑制作用。根据涡旋的运动特征可将结构后方的尾流场分为四种不同的涡脱落模式: 子管涡脱落模式、双管涡脱落模式、涡脱落抑制模式以及整体涡脱落模式, 并确定了各种模式发生的条件范围。在子母管间距一定时, 子管涡脱落强度随着直径比 d/D 的增大而增大; 而母管涡脱落强度随着 d/D 的增大而减小。

关键词: 子母管结构; 近壁面; 涡脱落; PIV

1 引言

子母管结构是一种特殊的海底管道形式, 通常由一大一小两根管道绑缚而成。由于子管(小圆柱)的存在会使母管(大圆柱)周围的绕流场发生改变, 在适当的间距情况下, 子管可以抑制母管后方的尾涡脱落; 同时如果母管与底面之间的距离较小, 则壁面也会对母管后方的涡脱落现象产生一定的抑制作用, 从而削弱激振力的大小, 减轻结构的涡激振动效应。

已往对子母管结构的研究多数都是对其受力系数进行研究。李玉成等^[1]对波流共同作用下的子母管结构水动力特性进行研究, 发现子母管的阻力系数随 KC 数的增加而减小。Kalghatgi 和 Sayer^[2]实验研究了单向流作用下管床间隙比对子母管结构阻力(拖曳力)系数及升力系数的影响。Kamarudin 和 Thiagarajan^[3]通过数值模拟的方法研究了子管相对于母管不同位置时阻力系数及升力系数的变化。Zhao 等^[4]数值模拟了壁面附近子母管结构周围的流场和水动力, 分析了子母管间距比及管床间隙比对子母管结构的涡脱落、阻力系数及升力系数的影响。

可见, 日前对于子母管结构尾流场涡脱落规律及抑制的研究工作开展得并不广泛, 且仅见于数值模拟; 而之前的试验工作多数采用流场显示技术对流场结构进行研究, 对涡脱落强

*国家自然科学基金(10872198)和中国科学院“十一五”知识创新工程重要方向项目(KJCX2-YW-L07)。

度的定量测量开展较少。本研究将利用 PIV 粒子图像测速技术对亚临界条件下近壁面处的子母管结构的绕流场进行瞬时全流场测量；通过对流场旋流强度和速度矢量场的分析，研究多个因素对近壁面子母管结构涡脱落的影响规律。

2 试验方法与结果分析

2.1 试验设置与研究方法

实验中的 PIV 系统由双脉冲激光器、CCD 相机以及图像处理软件等部分组成。由于海底管道与海床之间狭缝处的流动对管道水动力特性有重要的影响，本研究在水槽实验段底部，专门设计安装了一块 $1.0\text{m} \times 1.0\text{m}$ 的透光玻璃板，使激光片光源透过玻璃板从水槽下方向上照射整个流场区域，以便于对管道与壁面直间狭缝流场进行精确的测量，这也是本实验与以往的激光由上方照射的 PIV 测量方法的最大改进之处。试验中流场图像采集频率为 4.97Hz 。子母管结构模型采用有机玻璃管制作。母管外径 $D=80\text{mm}$ ；子管外径采用三种不同的尺寸，分别为 $d=20\text{mm}$ 、 30mm 和 40mm 。实验的流速范围为 $U=0.15\sim 0.55\text{m/s}$ ，即 $Re=1.2 \times 10^4 \sim 4.4 \times 10^4$ ，流动属于亚临界流动状态。边界层厚度为 $\delta \approx 0.075D \sim 0.144D$ 。实验中母管与底面的间距为 $e=0\sim 1.0D$ ；子管位于母管的正上方，子母管间距范围为 $G=0\sim 0.5D$ 。

流场速度梯度张量方程的特征值的虚部 λ_{ci} 可写成：

$$\lambda_{ci} = -\left(\frac{\partial u}{\partial y} \cdot \frac{\partial v}{\partial x} - \left(\frac{\partial u}{\partial x} \cdot \frac{\partial v}{\partial y}\right) / 2 + \left(\frac{\partial^2 u}{\partial^2 x} + \frac{\partial^2 v}{\partial^2 y}\right) / 4\right) \quad (1)$$

根据 Adrian 等^[5]的研究，流场中的旋涡运动可由 λ_{ci} 的正值部分进行表示，即 $\max(0, \lambda_{ci})$ ，称为旋流强度 (swirling strength)，本研究用 W 进行表示；流场中的剪切运动则由 λ_{ci} 的负值部分进行表示，即 $\max(0, -\lambda_{ci})$ ，称为剪切强度。因此可以利用 λ_{ci} 值的正负来准确区分流场中的旋涡运动与剪切运动。本研究中将采用旋流强度 W 作为主要参数来研究涡脱落的强度。

2.2 子母管间距对结构尾迹涡脱落的影响

对于水平壁面对单独圆柱涡脱落影响的研究已经开展得十分广泛，因此本部分将首先固定母管与水平壁面之间的距离 (e/D)，变化子母管间距比 (G/D) 来研究 G/D 对母管涡脱落的影响。图 1 为一组在雷诺数 $Re=4.4 \times 10^4$ ($U=0.55\text{m/s}$) 下的远离壁面处 ($e/D=0.95$) 的子母管结构尾流场的旋流强度分布。图中白色圆形区域为子母管结构所在位置，来流方向为从右至左。图中所显示的旋流强度场都处于一个涡脱落周期中的相同时刻，以便于直观地比较。

子母管间距比分别取值为 $G/D=0.375$ 、 0.25 、 0.125 和 0.0 。从图 1 中可以看出，随着子母管间距 G/D 的减小，母管尾流场的旋流强度逐渐减小，交替涡脱落逐渐变得不规则，直至消失。在图 1(a) 和 1(b) 中可以看见母管后方交替出现的涡旋，且图 1(b) 中涡脱落强度较图 1(a) 中略微减小；图 1(c) 中在母管后方已经没有交替的涡旋脱落，子管对母管上表面的涡脱落产生了明显的抑制作用，在母管下表面处的流场旋流强度变化较不明显；图 1(d) 中，子母管完全接触后，在整个结构的上方形成新的涡旋脱落，此时类似于一个等效直径等于两个圆柱之和的大圆柱，但旋流强度要远小于下表面附近处的数值。

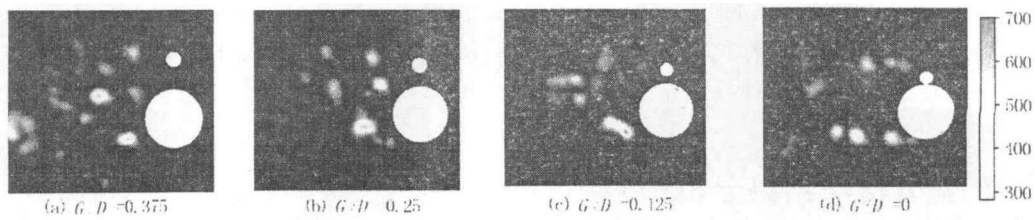


图1 母管尾流场旋流强度随子母管间距比的变化 ($d/D=0.25$, $e/D=0.95$, $Re=4.4\times 10^4$)

为了定量地分析母管尾流场涡脱落强度的变化规律,对 $e/D=0.95$ 时的不同雷诺数条件下的母管尾流场旋流强度随子母管间距比 G/D 的变化进行了统计。在实验结果的图像处理过程中可以看出,从圆柱上表面周期性脱落的旋涡为逆时针方向;而从圆柱下表面脱落的旋涡为顺时针方向。研究对结构后方 3 个涡脱落周期内的逆时针和顺时针旋涡的旋流强度最大值分别进行统计平均作为涡脱落强度的特征值。

图 2(a)中 W^+ 代表为母管后方上表面附近处脱落的逆时针旋涡的旋流强度最大值,图 2(b)中 W^- 代表母管下表面处形成的顺时针旋涡的旋流强度最大值。从图中可以看出对于子母管结构远离壁面的情况 ($e/D=0.95$) 下,旋流强度 W^+ 和 W^- 都随子母管间距比的减小而逐渐减小,尤其当 $G/D<0.15$ 时,子管对母管尾涡脱落的抑制作用明显,只是下表面附近处旋流强度最大值的变化(图 2(b))比上表面附近处旋流强度值变化(图 2(a))的幅度要小一些。管道的涡激振动是由于管道后方交替脱落的涡旋产生的周期性作用力而引起的,因此对于母管一侧涡脱落的抑制,即避免了周期性作用力的存在,从而起到对管道涡激振动的抑制作用。

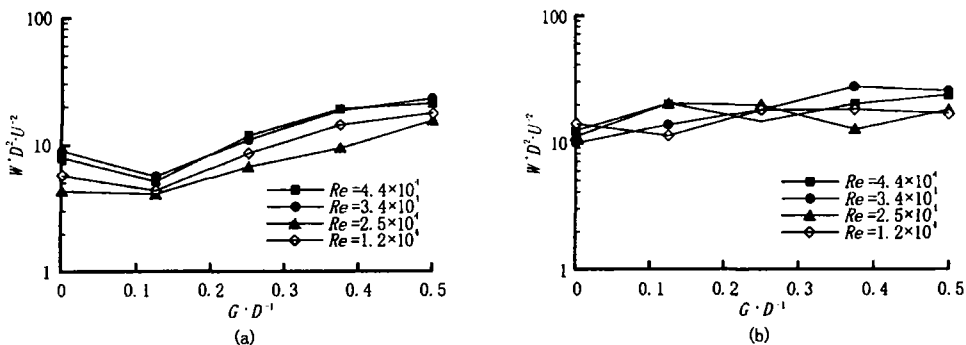


图2 母管上下表面处的旋流强度随子母管间距比的变化 ($e/D=0.95$, $d/D=0.25$)

接下来对子管尾迹涡脱落特性进行研究。图 3 显示了靠近壁面处的 ($e/D=0.1$) 子管尾流场旋流强度场随间距比 G/D 的变化过程。由于母管处于近离壁面处,其尾涡脱落基本受到抑制,因此,此种情况下可以更加清楚的分辨出子管后方的涡脱落情况。从图 3(a)和 3(b)中可见在子母管间距较大的情况下 ($G/D>0.25$),子管后方尾涡可以自由地交替脱落,只是在最大旋流强度值上有所减弱;而随着 G/D 的继续减小(图 3(c)),子管后方的尾涡脱落轨迹逐渐受到压制,且强度上也进一步减弱;当子管与母管完全接触时(图 3(d)),子管后方交上下表面交替脱落的涡旋完全受到抑制,只在其上表面存在脱落的涡旋,而没有交替涡脱落存在。

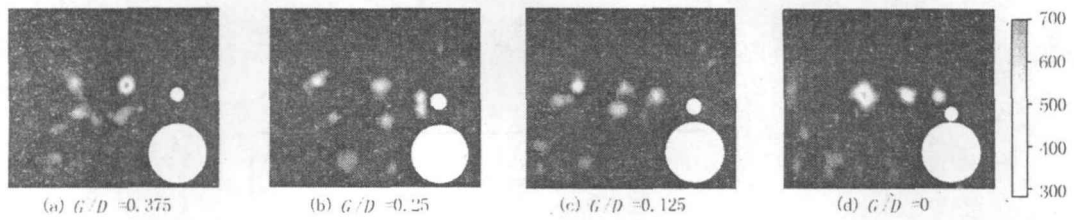


图3 子管尾流场旋流强度随子母管间距比的变化 ($e/D=0.1$, $d/D=0.25$, $Re=4.4 \times 10^4$)

2.3 子母管尾迹涡脱落模式

由上述的试验测量结果可以看到, 由于母管与壁面的间距 e/D 以及子母管之间的距离 G/D 的不同, 使子母管结构尾流场涡脱落的方式存在着很大的不同。根据对实验结果中的旋流强度场进行分析以及对流场矢量图的观察, 可以将子母管结构尾流场涡脱落分为四种不同的结构模式: 子管涡脱落模式、双管涡脱落模式、涡脱落抑制模式和整体涡脱落模式。图 4(a)所示的流场结构为子管涡脱落模式。此时由于母管距离底面较近, 涡脱落受到抑制; 但是子管与母管之间的距离相对较远, 子管的尾涡可以自由地交替脱落。图 4(b)所示的为双管涡脱落模式。此时子管、母管和壁面三者之间的距离都相对较远, 相互之间的流场干扰较小, 子管和母管的尾涡都可以自由地交替脱落。图 4(c)所示流场结构为涡脱落抑制模式。此时子管、母管与壁面之间的距离都较近, 影响了子管和母管的尾涡脱落。子管和母管此时可以看成是一个直径较大的等效圆柱, 只有在结构上表面一侧存在涡脱落, 而没有交替涡脱落存在, 故称之为涡脱落抑制模式。图 4(d)为子母管间距较近且结构离壁面较远的情况。此时子母管形成一个较大直径的等效圆柱, 在其后方出现了整体的交替涡脱落现象, 故称之为整体涡脱落模式。

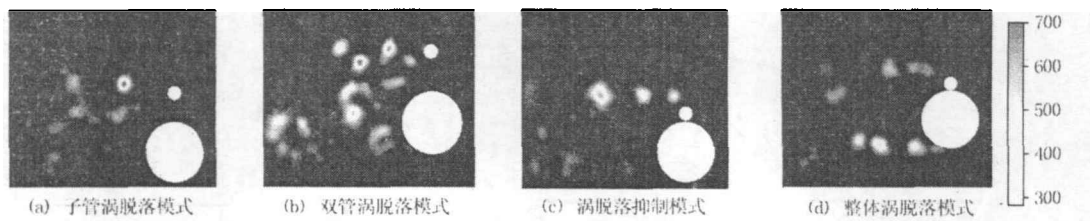


图4. 子母管结构尾流场涡脱落模式: (a) 子管涡脱落模式 (b) 双管涡脱落模式
(c) 涡脱落抑制模式 (d) 整体涡脱落模式

通过对大量的实验结果进行分析总结, 得出了子母管结构尾流场模式与 e/D 和 G/D 之间的变化关系, 并与 Zhao 等^[1]的数值结果进行了比较。从图 5 的比较结果可以看出, 本文试验结果和前者的数值结果吻合得较好。二者之间存在的略微差异可能来自于试验结果的判断误差以及子母管直径比的不同 (本研究 $d/D=0.25$, Zhao 等中 $d/D=0.20$)。

2.4 子母管直径比对涡脱落的影响

从对涡脱落模式的研究中可以看出子母管直径比 d/D 同样是影响结构涡脱落的一个因素。因此本部分内容将对子母管直径比 d/D 对结构尾涡脱落的影响进行研究。在实验中, 相应的子母管直径比为 $d/D=0.25$, 0.375 和 0.5 。研究分别对四种雷诺数条件下的子管后方旋流强度

最大值和母管上表面附近的旋流强度最大值进行统计分析。

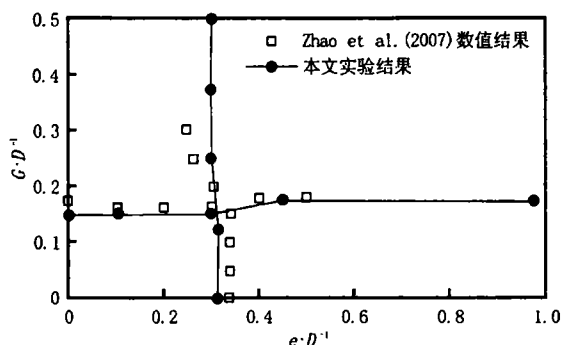


图5 子母管结构尾流场涡脱落模式 e/D 和 G/D 的关系 ($Re=4.4 \times 10^4$, $d/D=0.25$)

从图 6(a)中可以看出,子管后方的旋流强度最大值随着 d/D 的增大而增大。随着子管直径的增大,母管对子管周围流场的控制能力减小,子管的尾涡也就能够更加自由地周期性脱落,强度也随之增大;而对于母管结构而言(图 6(b)),子管直径的增大,子管对母管的抑制作用也就逐渐增大,因此呈现出母管上表面附近的旋流强度最大值相应减小的趋势,但是其受影响程度相对于子管的尾流场所受影响的程度较弱。

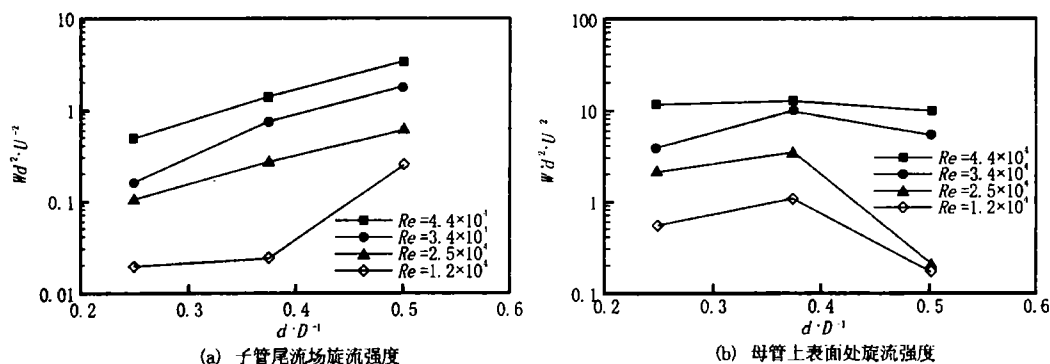


图6 子母管结构尾流脱落强度随直径比的变化: (a) 子管尾流场旋流强度; (b) 母管上表面处旋流强度

3 结语

利用特殊的底部激光照射方法对亚临界条件 ($Re=1.2 \times 10^4 \sim 4.4 \times 10^4$) 水流作用下近壁面处子母管结构的尾流场进行 PIV 粒子图像速度场测量。通过对流场旋流强度的分析,研究了子母管间距比 (G/D)、母管与壁面的距离 (e/D) 以及子母管直径比 (d/D) 等因素对近壁面附近子母管结构尾迹涡脱落的影响规律。主要结论如下:

1) 当 $G/D > 0.25$ 时,子管对母管的涡脱落影响较小,二者尾迹相互独立,形成两条独立的

涡街; 当 $G/D < 0.15$, 子管对母管上表面的涡脱落抑制作用明显, 同时母管对子管的涡脱落也有抑制作用。

2) 根据 G/D 与 e/D 的取值不同, 子母管结构的尾流场表现为四种涡脱落模式, 即子管涡脱落模式、双管涡脱落模式、涡脱落抑制模式和整体涡脱落模式, 并确定了各种模式发生的条件范围。

3) 在子母管间距一定时, 子管后涡脱落强度随着直径比 d/D 的增大而增大; 而母管涡脱落随着直径比 d/D 的增大受到抑制, 涡脱落强度有减小的趋势。

参 考 文 献

- [1] 李玉成, 张宇川, 孙映. 波流共同作用下近底子母管的水动力特征. 水动力学研究与进展, 1994, 9 (1): 51-59
- [2] Kalahatgi S G, Sayer P G. Hydrodynamic forces on piggyback pipeline configurations. Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering. 1997, 123 (1): 16-22
- [3] Taniguchi S, Miyakoshi K. Fluctuating fluid forces acting on a circular cylinder and interference with a plane wall. Experiments in Fluids, 1990, 9: 197-204
- [4] Zhao M, Cheng L, Teng B. Numerical modeling of flow and hydrodynamic forces around a piggyback pipeline near the seabed. Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, 2007, 133 (4): 286-295
- [5] Adrian R J, Christensen K T, Liu Z C. Analysis and interpretation of instantaneous turbulent velocity fields. Experiments in Fluids, 2000, 29 (4), 275-290

Near-wall effect on vortex shedding from piggy-back pipelines

ZANG Zhi-peng, GAO Fu-ping, CUI Jin-sheng, TANG Chi

(Key Laboratory for Hydrodynamics and Ocean Engineering, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100190. Email: zpzang@imech.ac.cn)

Abstract: A special bottom-irradiation method is applied in measuring the wake flow field of a piggyback pipeline near a plane wall with the Particle Image Velocimetry (PIV). The effects of the spacing ratio between the two pipes (e/D), the gap ratio between large pipe and the plane wall (G/D) and the diameter ratio (d/D) on the characteristics of the vortex shedding from the structure are investigated based on the swirling strength analysis. In the sub-critical regime, when $G/D > 0.25$, the small pipe almost has no effect on the vortex shedding from the large pipe; there are two independent vortex streets behinds the piggyback pipeline. When $G/D < 0.15$, the vortex shedding from the large pipe is suppressed significantly by the small pipe, meanwhile, the large pipe also has suppression effect on the vortex shedding from the small pipe. Four vortex shedding modes around the piggyback configuration are distinguished: small pipe shedding mode, dual shedding mode, shedding suppressed mode and one-body shedding mode, and the critical values of G/D and e/D for these modes are obtained. When the gap between the two pipes is constant, the strength of the vortex shedding from the small pipe increases with the increase of d/D and that from the large pipe decreases with the increase of d/D .

Key words: piggyback pipeline, plane wall, vortex shedding, PIV.